

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

KOMPENZACE ÚČINÍKU VLASTNÍ SPOTŘEBY  
ŠPIČKOVÉ VÝTOPNY OLOMOUČ  
POWER FACTOR COMPENSATION OF HOME  
CONSUMPTION FOR HEATING PLANT OLOMOUČ

2015

VOJTĚCH POLÁŠEK

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Polášek**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Kompenzace účinníku vlastní spotřeby špičkové výtopny Olomouc**  
**Power Factor Compensation of Home Consumption for Heating Plant**  
**Olomouc**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor kompenzace účinníku
2. Popis elektročásti špičkové výtopny Olomouc
3. Návrh kompenzačního zařízení pro vlastní spotřebu
4. Zhodnocení navrženého řešení

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex a.s., Ostrava, 2008.
2. Pauza, J., Krychtánek, Z.: Elektrické stanice. SNTL Praha, 1989.
3. Santarius P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
4. Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL Praha, 1980.
5. Technická dokumentace výtopny Olomouc, firemní literatura a katalogy.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

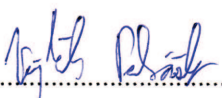


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6.5.2015



Vojtěch Polášek

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Zdeňku Medvedcovi za jeho rady při tvorbě této práce. Mé díky také patří zaměstnancům firmy *Veolia Energie ČR* zejména panu Ing. Romanovi Niessnerovi za jeho velkou podporu a ochotu, která mi byla nesmírnou pomocí při psaní práce. A dále pak panu Stanislavu Látalovi z téže firmy za jeho konzultace a předané informace ohledně provozování vytopny.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku kompenzace účinníku, tedy kompenzace jalového výkonu v objektu *Špičkové výtopny Olomouc*, patřící firmě *Veolia Energie ČR*. První část práce obsahuje teoretický rozbor základních pojmů a principů kompenzace. Následující části jsou věnovány popisu objektu, zatížení výtopny v průběhu roku a odhadu instalovaných výkonů zařízení, které jsou nutné pro chod jednotlivých kotlů. Závěrečná část se týká návrhu umístění kompenzačních zařízení, orientačního výpočtu kompenzačního výkonu a doporučení pro další postup při realizaci kompenzace.

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the issue of power factor correction (PFC) – reactive power compensation – in *Peak Heating Plant Olomouc* which belongs to *Veolia Energie ČR*. First part of the work contains theoretical analysis of basic terms and principles of PFC. Next parts deals with description of the object, load of the heating plant during the year and estimated installed power of the devices that are necessary for the operation of the boilers. The final part concerns suggestion for the placement compensation devices, approximate calculation of compensation power and recommendation for the following procedure for the implementation of PFC.

## **Klíčová slova**

Kompenzace účinníku, kompenzace jalového výkonu, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, kondenzátor, kompenzační zařízení

## **Keywords**

Power factor correction, reactive power compensation, active power, reactive power, apperent power, capacitor, compesation device

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Název	jednotka
C	kapacita kondenzátoru	[F]
C <sub>D</sub>	celková kapacita zapojení do hvězdy	[F]
cosφ	účinník	[-]
cosφ <sub>k</sub>	účinník po kompenzaci	[-]
C <sub>Y</sub>	celková kapacita zapojení do trojúhelníka	[F]
f	frekvence	[Hz]
f <sub>r</sub>	rezonanční frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
i(t)	okamžitá hodnota proudu	[A]
I <sub>m</sub>	amplituda proud	[A]
I <sub>K</sub>	hodnota proudu po kompenzaci	[A]
k <sub>p</sub>	činitel kompenzace	[-]
L	indukčnost	[H]
N	počet stupňů	[-]
P	činný výkon	[W]
p(t)	okamžitý výkon	[W]
P <sub>n</sub>	jmenovitý výkon	[W]
P <sub>uš</sub>	ušetřené činné ztráty	[W]
P <sub>ztr</sub>	činné ztráty (ztráty činného výkonu)	[W]
P <sub>ztr K</sub>	činné ztráty po kompenzaci	[W]
Q	jalový výkon	[VAr]
Q <sub>c</sub>	kompenzační jalový výkon	[VAr]
Q <sub>C1</sub>	jalový výkon jednoho kompenzačního stupně	[VAr]
Q <sub>L</sub>	jalový výkon induktivní zátěže	[VAr]

R	činný odpor	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
T	perioda	[s]
$\operatorname{tg}\varphi$	tangenta úhlu fázového posunu	[-]
$\operatorname{tg}\varphi_k$	tangenta úhlu fázového posunu po kompenzaci	[-]
U	napětí	[V]
$u(t)$	okamžitá hodnota napětí	[V]
$U_m$	amplituda napětí	[V]
$U_s$	sdružené napětí	[V]
$\varphi$	fázový posun	[-]
$\varphi_k$	fázový posun po kompenzaci	[-]
$\omega$	úhlová rychlost	[min <sup>-1</sup> ]
PFC	Power factor correction Kompenzace účinníku	
ŠVOL	Špičkový výtopna Olomouc	
TOL	Teplárna Olomouc	
SV	spalinový ventilátor	
VV	vzduchový ventilátor	
EN	elektro napáječka	
UV	univerzální vody	

1.	Úvod.....	1
2.	Základní pojmy .....	2
2.1	Okamžitý výkon .....	2
2.2	Činný výkon - P.....	2
2.3	Jalový výkon - Q .....	3
2.4	Zdánlivý výkon - S.....	3
2.5	Účinník - $\cos\varphi$ .....	4
3.	Kompensace účinníku .....	5
3.1	Důvody kompenzace .....	5
3.2	Výhody kompenzace .....	5
3.3	Vztahy platné při kompenzaci .....	6
4.	Metody kompenzace účinníku.....	7
4.1	Centrální kompenzace .....	7
4.2	Skupinová kompenzace .....	8
4.3	Individuální kompenzace.....	8
5.	Druhy kompenzačních zařízení .....	9
5.1	Statické kompenzátory .....	9
5.1.1	Zapojení do hvězdy .....	10
5.1.2	Zapojení do trojúhelníka.....	10
5.1.3	Ztráty statických kompenzátorů.....	11
5.1.4	Chráněná kompenzace .....	11
5.2	Rotační kompenzační zařízení.....	12
6.	Řízení kompenzačního výkonu .....	13
6.1	Stupňovité spínání .....	13
6.1.1	Kontaktní spínání .....	14
6.1.2	Bezkontaktní spínání .....	14
6.2	Plynulé řízení .....	14
6.2.1	Plynule řízené pasivní – s dekompenzační filtry.....	14



6.2.2	Plynule řízené aktivní .....	15
6.2.2.1	Paralelní aktivní filtry .....	15
6.2.2.2	Sériové aktivní filtry .....	16
6.2.2.3	Kombinované aktivní filtry .....	16
7.	Popis zařízení .....	17
7.1	Základní popis .....	17
7.2	Technický popis .....	19
8.	Specifikace zatížení .....	20
8.1	Zatížení zařízení v průběhu roku .....	20
8.2	Určení maximálního zatížení .....	22
8.3	Určení minimálního zatížení .....	26
9.	Technické řešení kompenzace .....	27
9.1	Výběr způsobu kompenzace .....	27
9.2	Rozmístění kompenzace .....	28
9.3	Určení kompenzačního výkonu .....	28
9.4	Cenový odhad realizace kompenzace .....	31
10.	Závěr .....	35
	Seznam použité literatury: .....	36
	Přílohy: .....	37

## 1. Úvod

Jalový výkon je nedílnou součástí přenesené energie mezi zdrojem a spotřebičem. Jalový se nazývá proto, že tuto část energie nelze nikterak zužítkovat, a tedy pouze zbytečně zatěžuje přenosovou síť. Z tohoto důvodu zákon stanovuje pravidla, která finančně penalizují odběratele, kteří přenášejí velké množství tohoto výkonu, nebo jej naopak dodávají do sítě. Jalový výkon je však nutný k provozu motorů a dalších induktivních spotřebičů, které se v hojné míře využívají v průmyslových závodech. Proto by měl být každý technologický celek vybaven kompenzačním zařízením, popř. několika kompenzačními zařízeními, která budou tento výkon regulovat, a tím udržovat účinník v takzvaném neutrálním pásmu. Takto se provozovatelé tohoto zařízení vyhnou placení cenových přírážek od distributora.

Kompenzační zařízení jsou dimenzovány tak, aby výsledný účinník měl předepsanou hodnotu  $\cos\varphi = 0,95$ .

Tato práce slouží k navrhnutí řešení kompenzace účinníku vlastní spotřeby *Špičkové výtopny Olomouc*. První části této práce se zabývají teoretický rozbořem a různými možnostmi provedení kompenzace. Na tyto části pak navazuje popis objektu a rozbor zatížení výtopny, který byl nutný pro odhad kompenzačního výkonu. Práce je zakončena doporučením pro samotnou realizaci kompenzace.

## 2. Základní pojmy

### 2.1 Okamžitý výkon

Okamžitý výkon, je dán součinem okamžitých hodnot napětí  $u(t)$  a proudu  $i(t)$ , kde:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad [\text{V}]$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad [\text{A}]$$

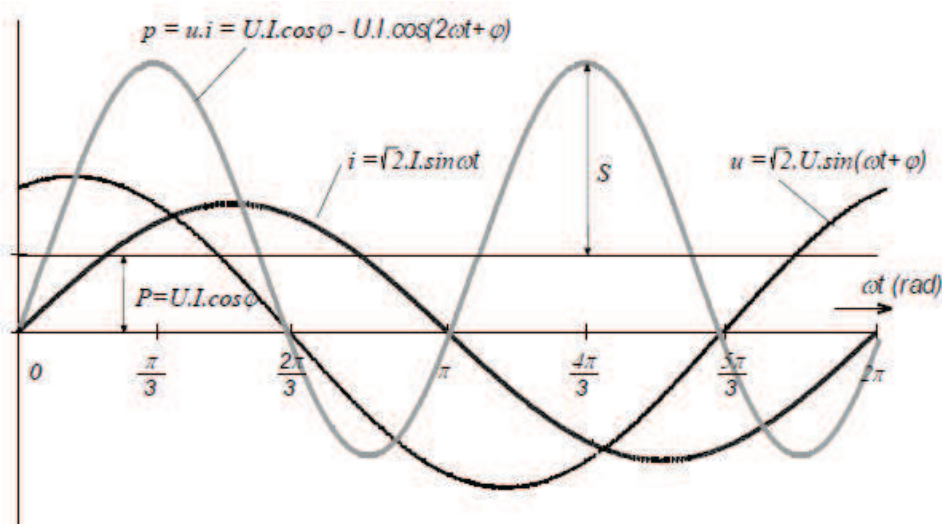
Platí tedy, že:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin(\omega t) = U \cdot I \cdot \cos\varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi) [\text{W}]$$

po úpravě:

$$p(t) = U \cdot I \cdot [\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = S \cdot [\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad [\text{W}]$$

,kde  $S = U \cdot I$  – zdánlivý výkon [VA]



Obr. 2.1 Graf průběhů napětí  $u(t)$ , proudu  $i(t)$  a výkonu  $p(t)$  [3]

### 2.2 Činný výkon - P

Je definován jako střední hodnota okamžitého výkonu za dobu jedné periody. [3]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot [\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \cdot dt = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}]$$

Tento vzorec však platí pouze pro čistě sinusový průběh napětí a proudu, pokud by tato podmínka neplatila, pak by činný výkon byl roven součtu všech jednotlivých činných výkonů.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad [\text{W}]$$

Pro třífázovou soustavu platí

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}]$$

Tento výkon vytváří v obvodu činné ztráty a v koncovém spotřebiči převádí elektrickou energii na jiný druh energie (mechanickou, tepelnou, atd.).

Jednotkou činného výkonu je watt [W].

## 2.3 Jalový výkon - Q

V praxi však velká část spotřebičů potřebuje ke své činnosti vytvořit magnetické pole, ať už netočivé (např. transformátory), tak točivé (např. asynchronní motory). K vytvoření tohoto pole potřebují jalový výkon, který se pouze přelévá ze zdroje do spotřebiče a slouží právě k vytvoření pole (již zmíněné magnetické - u cívky nebo elektrické - u kondenzátorů). Nevykonává tedy žádnou činnou práci.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad [\text{VAr}]$$

Pro trojfázovou soustavu

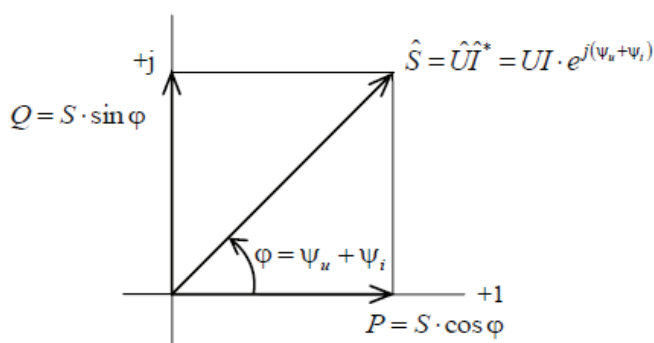
$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad [\text{VAr}]$$

Jednotkou jalového výkonu je voltampér reaktanční [VAr].

## 2.4 Zdánlivý výkon - S

Je to pouze teoretický výkon, zavedený čistě pro výpočtové úkoly. Vypovídá o hodnotě činného výkonu v případě, kdy  $\cos\varphi=1$ , tedy když je činný výkon maximální a jalový výkon nulový.

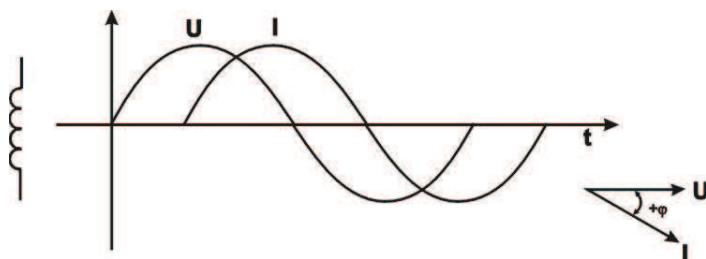
Jednotkou zdánlivého výkonu je voltampér [VA].



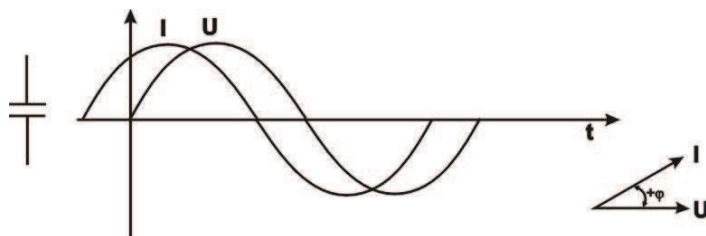
Obr. 2.2 Trojúhelník výkonů [3]

## 2.5 Účíník - $\cos\varphi$

Účíník můžeme definovat pomocí napětí a proudu jako fázový posun mezi těmito dvěma veličinami, kdy rozlišujeme induktivní účíník u induktivních spotřebičů (obr. 2.3) nebo kapacitní účíník u kapacitních spotřebičů (obr. 2.4)



Obr. 2.3 Průběh napětí a proudu induktivních spotřebičů [10]



Obr. 2.4 Průběh napětí a proudu kapacitních spotřebičů [10]

Nebo můžeme definovat účíník pomocí výkonu činného a zdánlivého (obr. 2.2), kde platí

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad [-]$$

V praxi však měříme častěji výkon činný a jalový a hodnotu účíníku určujeme právě z těchto výkonů. Používáme potom upravený vztah

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P} \quad [-]$$

Nesmíme zapomenout, že tyto zjednodušené vztahy, platí pouze pro sinusový signál první harmonické! Pokud by průběh nebyl čistě sinusový, výše zmíněné vztahy by se značně zkomplikovaly.

Jak je již psáno výše, při rozvodu elektrické energie je použito mnoho různých druhů spotřebičů. Některé z nich mění elektrickou energii na teplo – mají tedy čistě odporovou zátěž, a tím získávají čistě činný charakter. Tyto spotřebiče nezpůsobují fázový posun mezi napětím a proudem, tím pádem neodebírají ze sítě žádnou jalovou složku - kompenzace není nutná. Na druhou stranu jsou spotřebiče, které ke své činnosti potřebují jalovou energii pro vytvoření pole – odkloňují fázor napětí od fázoru proudu. Jak je již zmíněno na začátku této podkapitoly dělíme spotřebiče na induktivní a kapacitní.

Induktivní jsou ty spotřebiče, které ke své práci potřebují vytvořit magnetické pole – odebírají ze sítě jalovou složku proudu induktivního charakteru. Do této skupiny spotřebičů patří zejména elektromotory, transformátory a indukční pece.

Kapacitní spotřebiče jsou pak ty spotřebiče, které vytváří elektrické pole. Řadíme zde zejména kondenzátory a dlouhá vedení.

V průmyslových provozech většinou najdeme větší množství induktivních spotřebičů. Induktivní složka napájecího proudu však nekoná činnou práci a zbytečně pak zatěžuje distribuční síť i další zdroje. Musíme tedy omezit tuto jalovou část proudu – provedeme kompenzaci.

### **3. Kompenzace účinníku**

#### **3.1 Důvody kompenzace**

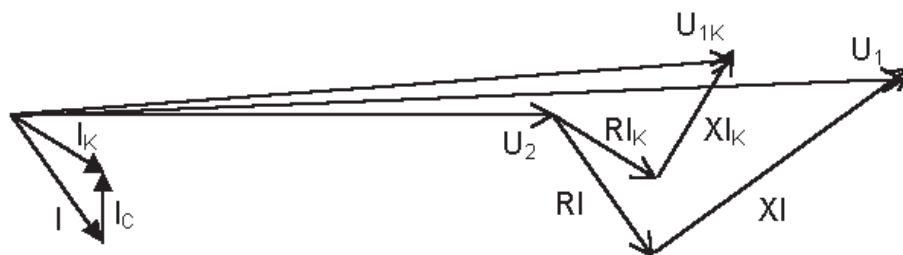
Hlavním důvodem kompenzace účinníku je samozřejmě ekonomika. Při malém účinníku se nám zmenšuje možnost využití rozvodných elektrických zařízení, jelikož je přenášený menší činný výkon. Dále se nám zvýší pořizovací náklady všech zařízení – musíme je dimenzovat na větší proudy, tedy na větší hodnoty zdánlivého výkonu. S tím spjaté jsou i ztráty v rozvodech elektrické energie. Víme, že tyto ztráty jsou přímo úměrné na čtverci proudu. V neposlední řadě má velikost účinníku i vliv i na samotnou platbu za spotřebovanou energii – rozvodné podniky penalizují velkoodběratelé s účinníkem nižším, či vyšším než je uvedeno v energetickém zákoně – to znamená 0,9-1,00. [9]

#### **3.2 Výhody kompenzace**

Shrnutí výhod, kvůli kterým kompenzujeme účinník

- Zvětšení přenášeného činného výkonu
- Zvýšení využití rozvodných elektrických zařízení
- Snížení ztrát v rozvodu elektrické energie  $P_{ztr} \approx R \cdot I^2$
- Zlepšení stability rozvodné sítě
- Snížení finančního postihu ze strany dodavatele [4]

### 3.3 Vztahy platné při kompenzaci



Obr. 3.1 Fázorový diagram [10]

Při kompenzaci se činná složka proudu nemění, mění se pouze složka jalová z hodnoty  $I_K$  na hodnotu  $I_K$ . Taktéž se mění úhel (fázový posun) z  $\varphi$  na  $\varphi_K$ . Určujeme tzv. koeficient kompenzace  $k$  a stupeň kompenzace  $k_p$ .

Platí

$$k = \frac{I_K}{I} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_K} \quad [-]$$

$$k_p = 1 - k = \frac{I_C}{I} = \frac{\tan \varphi - \tan \varphi_K}{\tan \varphi} \quad [-] \quad [1]$$

Známe-li činný výkon spotřebiče, jeho účinník a požadovaný účinník, pak můžeme určit potřebný kompenzační výkon.

Pro trojfázovou síť platí

$$Q_C = U_S^2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_K) \quad [\text{VAr}]$$

Požadovaný účinník  $\cos \varphi_K$  se zpravidla pohybuje kolem hodnoty 0,95-0,97. Na hodnotu  $\cos \varphi_K = 1$  se nekompenzuje z důvodu, aby nedocházelo k překompenzování a zároveň abychom se vyhnuli rezonančním jevům.

Z předchozího vztahu můžeme ještě vyjádřit kapacitu potřebného kondenzátoru v případě, že je kompenzátořem kondenzátorová baterie

$$C = \frac{Q_C}{U_S^2 \cdot \omega} \quad [\text{F}]$$

Pro činné výkony při kompenzaci v trojfázové soustavě platí

Před kompenzací

$$P_{ztr} = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{R}{U_S^2} (P^2 + Q^2) \quad [\text{W}]$$

Po kompenzaci

$$P_{ztr K} = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{R}{U_S^2} (P^2 + (Q - Q_C)^2) \text{ [W]}$$

Rozdílem těchto dvou hodnot dostaneme ztráty ušetřené

$$P_{u\check{s}} = \frac{R}{U_S^2} \cdot Q_C (2Q - Q_C) \text{ [W]}$$

Případně můžeme tyto ušetřené ztráty určit procentuálně z původních ztrát

$$P_{u\check{s}} = (P_{ztr} - P_{ztr K}) \cdot \frac{100}{P_{ztr}} = \left( \frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_K} \right) \cdot \cos \varphi \cdot 100 = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_K} \right) \text{ [W]}$$

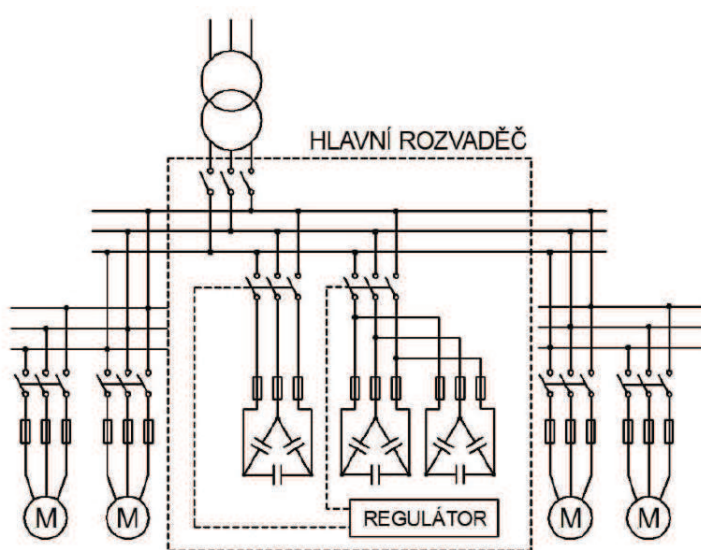
## 4. Metody kompenzace účinníku

### 4.1 Centrální kompenzace

Při tomto způsobu kompenzace umísťujeme kondenzátor hned za přívod z distribuční sítě. Kompenzujeme tedy najednou celý závod – předpokládáme, že závod má větší počet provozů a dílen, které napájí jedna rozvodna. Tato varianta je u nás nejpoužívanější. [1]

Výhodou této metody je, že kondenzátor z pravidla může být menší, než při jiných metodách. Další výhodou je pak fakt, že kompenzační zařízení je přehledné – veškeré vybavení se nachází na jednom místě. [1]

Nevýhodou je, že rozvodná síť není odlehčena od přenosu induktivního výkonu – veškeré vodiče musíme dimenzovat na plný výkon. Při použití kondenzátorových baterií je musíme opatřit regulátorem. [6]



Obr. 4.1 Centrální kompenzace [6]

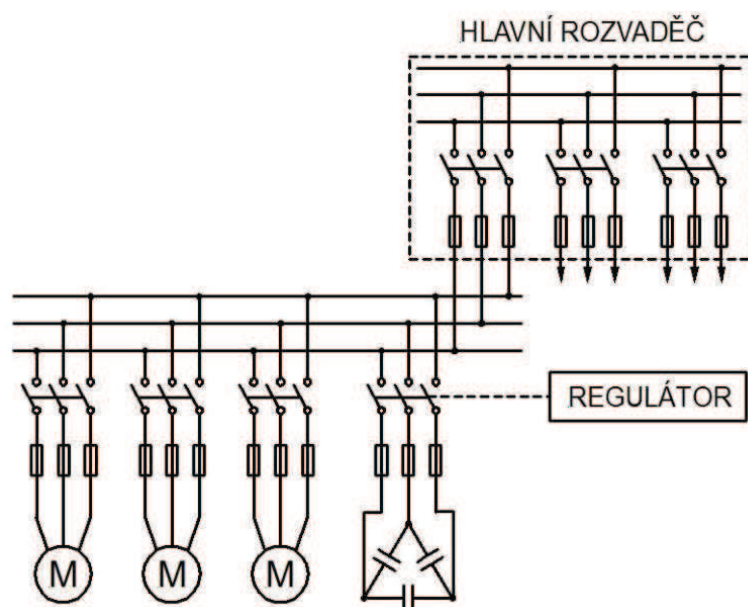


## 4.2 Skupinová kompenzace

Na rozdíl od centrální kompenzace skupinová kompenzace je určena pouze pro skupinu spotřebičů. Tyto spotřebiče by měly být nejlépe rozmístěny blízko sebe – např. jeden technologický celek nebo dílna.

Výhody použití skupinové kompenzace spočívají v tom, že velikost kapacitního výkonu je ve srovnání s individuální kompenzací menší. Ve srovnání s centrální kompenzací je výhoda v tom, že odlehčujeme napájecí vedení až k rozvaděči, kde je kompenzátor umístěn. [6]

Nevýhody jsou, že neodlehčíme vedení od kompenzátoru ke spotřebiči. Další nevýhodou je nutnost umístění vybíjecích odporů. [1]



Obr. 4.2 Skupinová kompenzace [6]

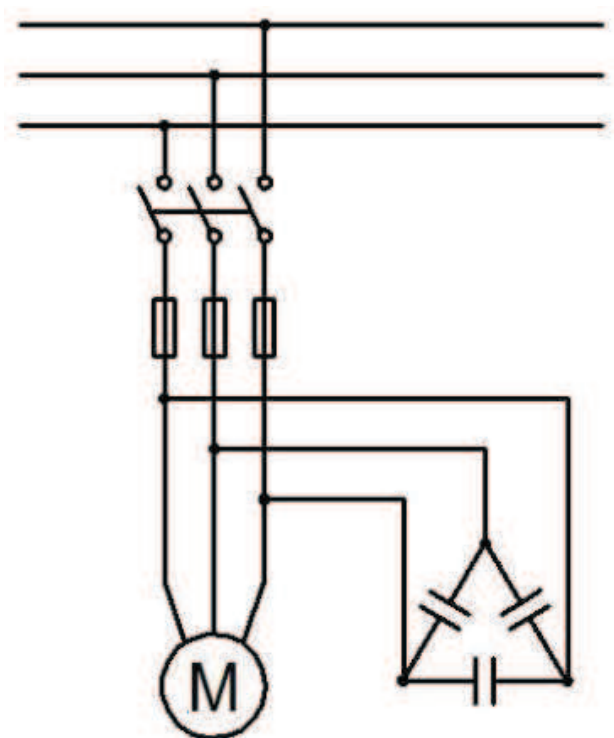
## 4.3 Individuální kompenzace

Kompenzátor umísťujeme přímo na svorky spotřebiče nebo do jeho blízkost. [6]

Výhody spočívají hlavně v tom, že induktivní výkon, se kompenzuje přímo na místě vzniku, čímž se odlehčí celé přívodní vedení. Což způsobí zmenšení ztrát ve vedení a úbytku napětí. Kompenzátor je navržen podle výkonu zařízení, které kompenzujeme – nedochází k překompenzování. [1]

Naproti tomu jsou zde i nevýhody této metody. Důležité jsou vyšší pořizovací náklady a náročnost na prostor. Tím, že má každý stroj vlastní kompenzátor, se zvyšují nároky i na údržbu

a kontrolu. Další nevýhodou je časová návratnost financí vložených do kompenzátorů – tato metoda se používá především pro zařízení s vysokým časovým využitím. [6]



Obr. 4.3 Individuální kompenzace [6]

## 5. Druhy kompenzačních zařízení

### 5.1 Statické kompenzátory

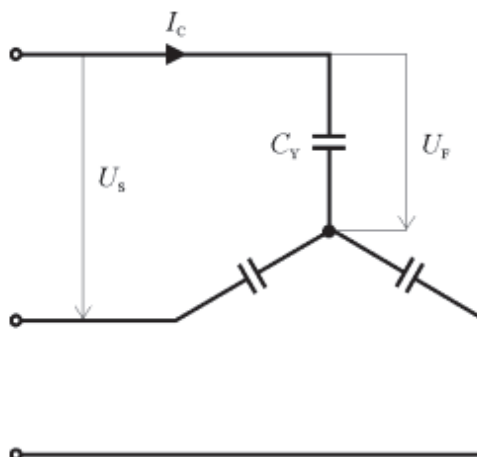
Statickými kompenzátory jsou myšleny veškeré kompenzátory vyjma rotačních kompenzátorů. Nejčastěji je označujeme jako statické kondenzátory nebo kondenzátorové baterie. Kompenzační výkon těchto baterií se může pohybovat od jednotek VAR, až po stovky kVAR. [4] [6]

Výhodou těchto statických kondenzátorů jsou menší pořizovací náklady v porovnání s rotačními kompenzátory, absence rotačních částí a jejich malé ztráty (0,3-0,5% jmenovitého výkonu). [1]

Hlavní nevýhodou je skoková změna kompenzačního výkonu, chceme-li měnit výkon kompenzátoru – změnu lze dosáhnout pouze připojováním a odpojováním dalších kondenzátorů. Chtěli bychom plynulé řízení - tedy bez skoků, musíme použít fázové řízení.

Při používání kondenzátorových baterií v třífázové soustavě máme dvě základní možnosti zapojení – do hvězdy a do trojúhelníka.

### 5.1.1 Zapojení do hvězdy



Obr. 5.1 Schéma zapojení kondenzátorových baterií do hvězdy

Toto zapojení je vhodnější pro hladiny vysokého napětí – v jednotlivých větvích je pouze fázová hodnota napětí a proud v jedné větvi je třetinový oproti zapojení do trojúhelníka. Kompenzační výkon baterií však bude, při stejné kapacitě kondenzátorů, nižší. [4]

Pro toto zapojení platí

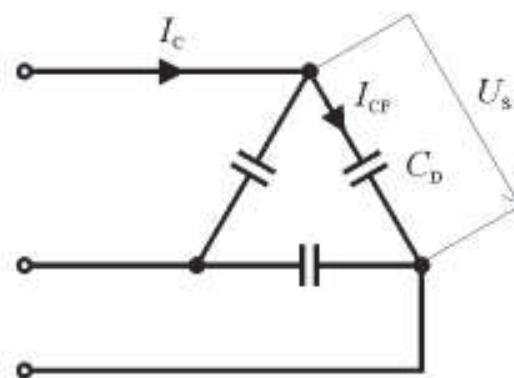
$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_Y \quad [\text{VAr}]$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VAr}]$$

po dosazení

$$Q_C = \frac{3I^2}{\omega \cdot C_Y} \quad [\text{VAr}]$$

### 5.1.2 Zapojení do trojúhelníka



Obr. 5.2 Schéma zapojení kondenzátorových baterií do trojúhelníka

Při srovnání se zapojením do hvězdy je hlavní výhodou výsledný kompenzační výkon, který je, při stejné kapacitě kondenzátorů, trojnásobně vyšší. To však nese zřejmou nevýhodu v podobě sdruženého napětí v jednotlivých větvích a tím i zvýšeného proudu, který danou větví prochází. [4]

Platí obdobné vztahy

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot 3 \cdot C_D \quad [\text{VAr}]$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VAr}]$$

po dosazení

$$Q_C = \frac{I^2}{\omega \cdot C_D} \quad [\text{VAr}]$$

Výše zmíněné vztahy platí pouze, pokud je trojfázové zapojení symetrické!

### 5.1.3 Ztráty statických kompenzátorů

Jedním z ukazatelů kvality kondenzátorů jsou jeho celkové ztráty. Ty se skládají z několika komponentů, jako jsou ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů atd. Tyto celkové ztráty jsou zahrnuty do ztrátového úhlu  $\delta$ , resp. do tangenty tohoto úhlu –  $\text{tg}\delta$ , který udává poměr mezi ekvivalentním sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při specifikovaném sinovém napětí a kmitočtu. [4]

Celkové ztráty pak můžeme určit vztahem

$$P_{ztr} = Q_C \cdot \text{tg}\delta \quad [\text{W}]$$

,který platí pro harmonický průběh napětí. Pokud je průběh neharmonický, pak platí vztah

$$P_{ztr} = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \text{tg}\delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \text{tg}\delta \quad [\text{W}]$$

,kde

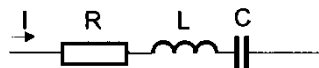
$n$  – řád harmonické

$U_n$  – napětí harmonické

$f_n$  – kmitočet harmonické

### 5.1.4 Chráněná kompenzace

Pro ochranění kompenzátorů před proudovým přetěžováním, vzniklých ať už vyššími harmonickými nebo přechodnými jevy, můžeme použít ochranou tlumivku, kterou zapojíme před kondenzátor a získáme tím jednoduchý sériový RLC článek. [1]



Obr. 5.3 Sériový RLC článek [1]

Tímto zapojením získáme sériový rezonanční obvod. Ten je naladěn na určitou rezonanční frekvenci

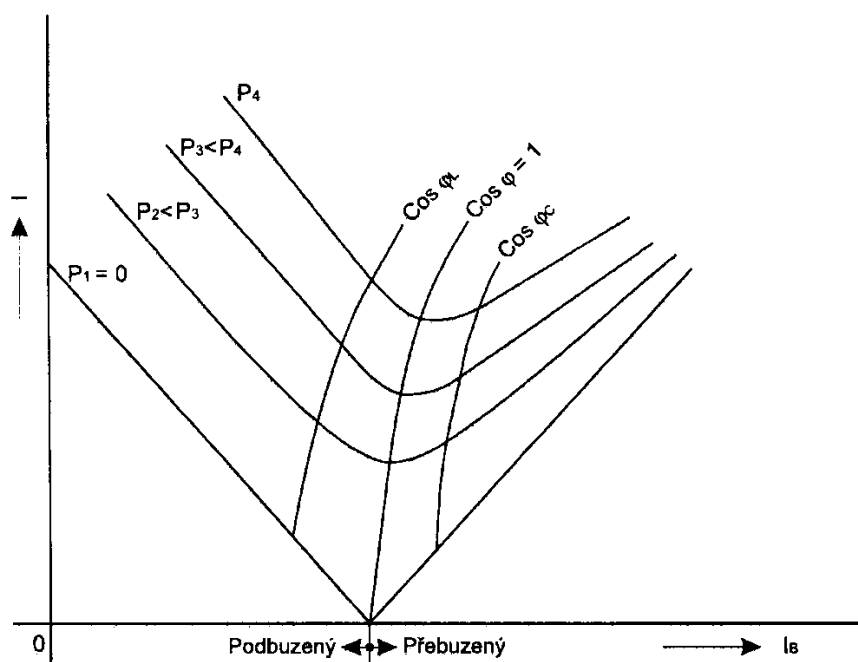
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}]$$

Chráněná kompenzace neslouží k odstraňování vyšší harmonické ze sítě! Chrání pouze kompenzační kondenzátory před jejich účinky! [1]

## 5.2 Rotační kompenzační zařízení

Rotačním kompenzačním zařízením myslíme synchronní stroje. Tyto stroje pracují v přebuzeném stavu. Tento stroj může pracovat naprázdno, tedy nemá hřídel zatíženou, mnohdy ji nemá ani vyvedenou, potom se jedná o rotačních kompenzátorech. Pokud na hřídeli předává i nějaký mechanický výkon bavíme se o klasických synchronních motorech.

Budeme-li při stálém napájecím napětí a stálém kmitočtu měnit velikost budícího proudu, tak za předpokladu konstantního momentu zátěžného momentu bude stálý i činný výkon. Změnou tohoto budícího proudu však můžeme měnit účinník odběru motoru jak do oblasti kapacitní, tak do oblasti induktivní. Vyneseme-li závislost statorového proudu na proudu rotorovém, získáme takzvané V křivky synchronního stroje (Obr. 5.4)



Obr. 5.4 V-křivky synchronního stroje [1]

Ze závislosti (Obr. 5.4) můžeme vidět, že pokud chceme konstantní účinník při různé velikosti zátěže, musíme regulovat budící proud!

Ve srovnání se statickými kompenzátory jsou však rotační kompenzátory náročnější na pořizovací náklady, proto se používají jen v případech, kdy je to ekonomicky zdůvodnitelné. Využívají se převážně pro hladinu vysokého napětí 6 kV s výkonem v rozmezí od 1 do 15 MVar. [1] [4] [6]

I přes moderní možnosti řízení budícího proudu, mají synchronní kompenzátory pomalou odezvu na potřebnou změnu jalového výkonu. Z toho vyplývá, že jsou nevhodné ke kompenzování spotřebičů, jejichž spotřeba jalového výkonu se často a rychle mění. Tedy jsou vhodnější pro případy, kdy je zátěž skoro konstantní či se mění jen pomalu.

Význam této formy kompenzace upadá – dává se přednost statickým kompenzátorům, které mají většinou menší pořizovací náklady a menší nároky na prostor a v neposlední řadě také na údržbu. [1] [4] [6]

## 6. Řízení kompenzačního výkonu

### 6.1 Stupňovité spínání

V průmyslových sítích jsou nejčastěji používané kompenzátory, u kterých můžeme stupňovitě měnit, tedy stupňovitě řízené kompenzátory. Velkou roli při jejich použití hraje počet a velikost stupňů. Volba počtu stupňů je přitom závislá na reálné velikosti jednoho stupně, na celkovém kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě výsledného účinníku. V ideálním případě platí vztah [1]

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \tan \varphi_k$$

kde

$Q_L$  – jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu  $P$

$Q_{C1}$  – jalový výkon jednoho kompenzačního stupně

$N$  – počet stupňů

Z předchozího vztahu můžeme vyjádřit vztah pro počet stupňů kompenzátoru

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan \varphi_k}{Q_{C1}}$$

### 6.1.1 Kontaktní spínání

Pracuje na principu přímého připínání nebo odepínání kompenzátorů. V kombinaci s jednoduchými výkonovými kondenzátory se běžně užívají v sítích, kde nejsou kladeny nároky na rychlost kompenzace a kde se nevyskytují vyšší harmonické složky proudu.

Často se v praxi využívají jako spínací prvek klasické stykače, avšak jejich nevýhodou je vznik přechodových jevů. Velkou proudové rázy můžou nabývat až hodnot 30násobku jmenovitých proudů. Další velkou nevýhodou je vznik rušivých jevů vlivem nesynchronního spínání, které mají zpětný vliv na napájecí síť. Tuto nevýhodu však můžeme alespoň zčásti eliminovat použitím předřadných tlumivek. [1] [6]

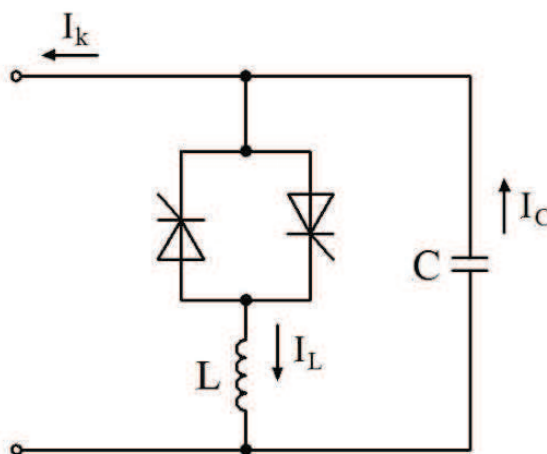
### 6.1.2 Bezkontaktní spínání

Užívají se v případech, kdy jsou kladeny větší nároky na rychlost změny jalového výkonu. Kontaktní spínač je nahrazen většinou tyristorovým spínacím modulem, který je ovládaný tranzistorovými výstupy regulátoru. Rychlost regulace je závislá na algoritmu, který pak daný regulátor užívá. V praxi se užívají skoro stejné regulační procesy jako pro kontaktní spínání, přepínání stupňů však probíhá značně rychleji. [1] [6]

## 6.2 Plynulé řízení

### 6.2.1 Plynule řízené pasivní – s dekompenzační filtry

Řízením proudu procházející tlumivkou můžeme plynule řídit jalový proud. Kapacitní proud není možno plynule řídit z důvodu přítomnosti přechodových jevů. K řízení se používají fázově řízené tyristory v antiparalelním zapojení (Obr 6.1)



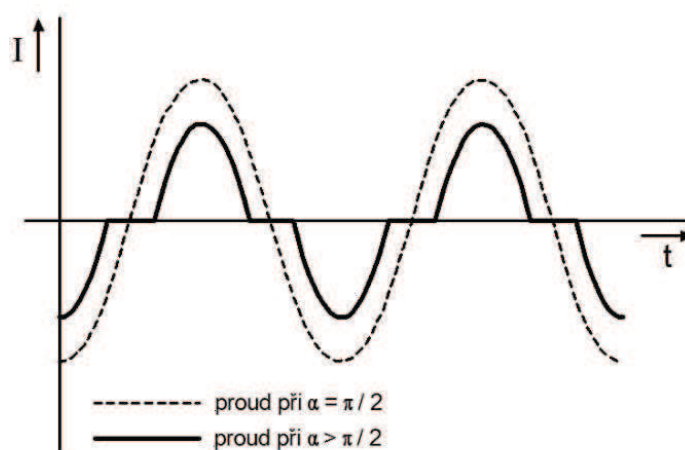
Obr. 6.1 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru [6]

$I_L$  – proud procházející tlumivkou

$I_C$  – proud procházející kondenzátorem

$I_k$  – celkový proud kompenzátoru

Tento jednoduchý obvod umožňuje měnit čistě induktivní proud od nulové hodnoty až do maximální hodnoty dané impedancí tlumivky. Fázové řízení můžeme měnit v intervalu  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ , kde  $\alpha$  je fázový řídicí úhel. Průběh proudu pro různý úhel řízení můžeme vidět na Obr. 6.2



Obr. 6.2 Průběh proudu pro různý úhel řízení [4]

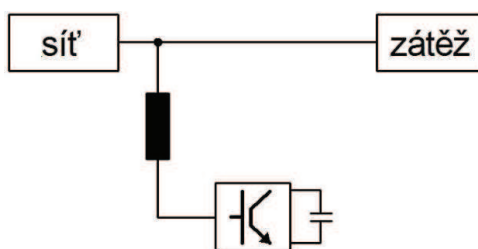
## 6.2.2 Plynule řízené aktivní

Paralelně nebo sériově zapojené generátory proudu, či napětí jsou řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech bylo zajištěné požadované potlačení nevhodných harmonických složek. Způsob zapojení určuje, zda můžeme vylepšit proud, napětí nebo oboje. Dle těchto požadavků je můžeme rozdělit na paralelní, sériové a kombinované aktivní filtry. [4]

### 6.2.2.1 Paralelní aktivní filtry

Je tvořen řízeným generátorem proudu, který je paralelně připojen k zátěži. Ten eliminuje nežádoucí vyšší harmonické tím, že vytváří stejné složky, jež však mají opačný směr a zavádí je do sítě. Filtruje se tímto proud odebíraný ze sítě, a tím se upraví i deformace napětí způsobené zátěží. Můžeme tedy provádět kompenzaci v každém okamžiku, bez možného vzniku nežádoucí rezonance. [4]



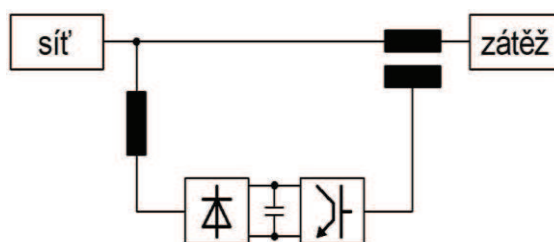


Obr. 6.3 Paralelní aktivní filtr [4]

Generátor je tvořen můstkovým zapojením tranzistoru IGBT. V praxi se používá typ s napěťovým zdrojem tvořený kondenzátory. Mezi vývody filtru a sítě je nutno zařazovat pasivní filtr pracující jako dolní propust, kvůli velkému množství vyšších harmonických, které obsahuje proud v oblasti spínací frekvence. [4]

#### 6.2.2.2 Sériové aktivní filtry

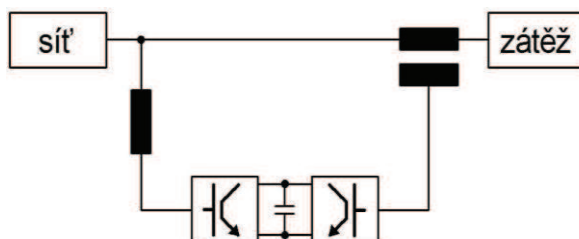
Je zapojen mezi svorky sítě a svorky spotřebiče. Je tvořen generátorem napětí. Tento filtr nám umožňuje měnit přiváděné napětí na požadovaný tvar. Mezi jeho vlastnosti patří schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy a špičky, odstraňovat vyšší harmonické, zajistit symetrické rozložení napětí a také dodávat energii v případě výpadků napětí, za předpokladu napájení filtru záložním zdrojem. [4]



Obr. 6.4 Sériový aktivní filtr [4]

#### 6.2.2.3 Kombinované aktivní filtry

Pokud spojíme do jednoho celku sériový a paralelní filtr, získáme tím kombinovaný filtr, získáme tím systém, který zajistí jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný průběh odebíraného proudu. [4]



Obr. 6.5 Sériový aktivní filtr [4]

## 7. Popis zařízení

### 7.1 Základní popis

Teplo pro potřeby soustavy centralizovaného zásobování teplem města Olomouce je vyráběno na dvou velkých zdrojích a to kombinovaným způsobem na *Teplárně Olomouc (TOL)* a dále výtopenským způsobem na *Špičkové výtopně Olomouc (ŠVOL)*. Oba zdroje provozuje a vlastní společnost *Veolia Energie ČR, a.s. Teplárna Olomouc* je hlavním zdrojem tepla pro soustavu *CZT* a je provozována celoročně. Palivovou základnu tvoří hnědé a černé uhlí. *Špičková výtopna Olomouc* má charakter špičkového a havarijního zdroje. Je provozována pouze v zimním a přechodovém období, při odstávkách a poruchách hlavního zdroje. Palivovou základnu *ŠVOL* tvoří těžký topný olej.

Teplo z obou zdrojů je po městě distribuováno prostřednictvím parní a horkovodní soustavy. Teplo je využíváno v průmyslu, pro vytápění objektů a dále pro přípravu teplé užitkové vody. Vzhled zdrojů je na následujících snímcích.



*Obr. 7.1 Letecký snímek Špičkové výtopny Olomouc*



*Obr. 7.2 Letecký snímek Teplárny Olomouc*

Na *Teplárně Olomouc* jsou instalovány dva parní uhelné kotle a dvě protitlaké turbíny *TG4* o výkonu 8 MW<sub>e</sub> a *TG3* o výkonu 41 MW<sub>e</sub>.

Na *ŠVOL* jsou instalovány čtyři parní kotle *K11*, *K12*, *K13* a *K14*. Mimo spalování těžkých topných olejů jsou kotle *K13* a *K14* uzpůsobeny i pro spalování zemního plynu. Technické údaje kotlů *K11* až *K14* jsou v *Tab. 7.1*.

Vzhledem ke snížení odběratelů technologické páry pro potřeby instalované technologie v průmyslových objektech provozují se na *ŠVOL* v posledních letech pouze kotle *K11* a *K12*.



*Obr. 7.3 Parní kotel K11*

*Tab. 7.1 Technické údaje kotlů*

Celkový instalovaný výkon zdrojů		
Parní výkon	300,0	t.h <sup>-1</sup>
Tepelný výkon	202,0	MW <sub>t</sub>
Tepelný příkon	220,76	MW <sub>t</sub>
Elektrický	0,0	MW <sub>e</sub>
Průměrný doba	120 000	GJ.rok <sup>-1</sup>

## 7.2 Technický popis

Napájení *Špičkové výtopny* z distribuční sítě 22 kV je zajištěno prostřednictvím dvou kabelových linek *VN967* (č. 58) a *VN968* (č. 20) z rozvodny Hodolany (ČEZ Distribuce) do rozvodny s označením *R1*, umístěné v areálu *ŠVOL*. Tyto kabelové linky jsou zaústěny do dvou samostatných částí distribuční rozvodny *R1*, které jsou mezi sebou propojeny podélnou spojkou sběren. Z této rozvodny *R1* je prostřednictvím linek *VN927* (č. 20), *VN962* (č. 11) a *VN929* (č. 58) napájena distribuční síť 22 kV města Olomouc. Dále z rozvodny *R1* je zajištěno napájení *ŠVOL* prostřednictvím kabelového propoje s podružnou rozvodnou *R2* vlastní spotřeby *ŠVOL* a dále je z rozvodny *R2* napájen transformátor *T4* (Obr 7.5) pro napájení vlastní spotřebu kotlů *K13* a *K14*.

Rozvodna *R2* může být napájena z kterékoli ze dvou částí rozvodny *R1*. Samotná rozvodna *R2* slouží k napájení transformátorů *T1*, *T2* a *T3* (Obr 7.4).



Obr. 7.4 Transformátory (zleva doprava) *T1*, *T2*, *T3*



Obr. 7.5 Transformátor *T4*

Transformátor *T4* (1600 kVA, 22/0,4/0,231 kV) slouží výhradně k napájení rozvodu R0,4 kV *rm13* a *rm14*, k napájení kotlů *K13* a *K14*, které v současné době nejsou téměř v provozu.

V současné době se výhradně provozují kotle *K11* a *K12*, které jsou napájeny z rozvodny R0,4 kV s označením *rm1* prostřednictvím transformátoru *T2* (1600 kVA, 22/0,4/0,231 kV).

Všechny tyto technologické rozvodny (*rm1*, *rm13*, *rm14*) a světelné rozvaděče *ro1* a *ro2* lze napájet ze společného rozvaděče *rm1.1*, který je napájen transformátorem *T1* (1600 kVA, 22/0,4/0,231 kV).

Světelné rozvaděče *ro1* a *ro2* jsou za normálního provozu napájeny transformátorem *T3* (250 kVA, 22/0,4/0,231 kV), paralelní provoz s transformátorem *T1*, nebo samotné spínání, aniž by došlo k přerušení napájení nelze provést, vzhledem k výkonovým rozdílům transformátorů a způsobu zapojení sekundárního vinutí *T3* (lomená hvězda).

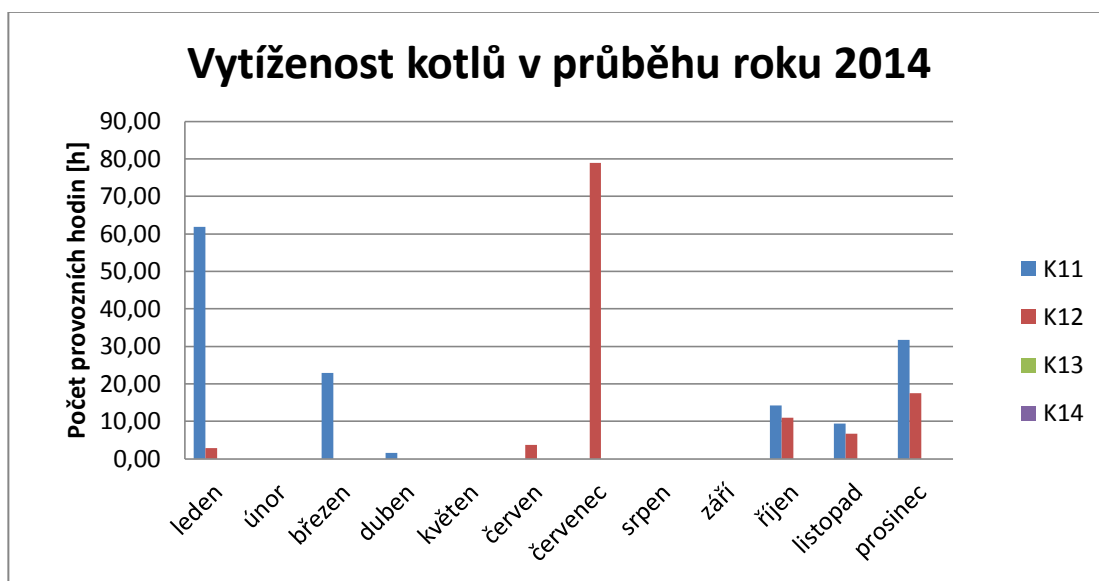
Technologické zařízení potřebné pro provoz kotlů (*K11*, *K12*, *K13* a *K14*) jsou zejména vzduchové a kouřové ventilátory, servopohony regulačních a uzavíracích ventilů, napájecí čerpadla a čerpadla úpravny vody. Všechny tyto pohony pro svou činnost potřebují jalovou energii, která nám zhoršuje celkový účinek a je tedy nutné zajistit dostatečnou kompenzaci. Toto neplatí pro zátěž odporovou např. světelné rozvody, proto v této práci nebudeme s netechnologickou spotřebou *ŠVOL* uvažovat.

## 8. Specifikace zatížení

Abychom mohli co nejlépe a nejpřesněji navrhnout potřebnou kompenzaci technologické spotřeby, musíme znát zatížení výtopny v průběhu celého roku. S ohledem na charakter provozování *ŠVOL* se zatížení v zimních měsících liší oproti letním měsícům. Regulátor kompenzačního výkonu musí být tedy navržen tak, aby byl schopen řídit kompenzaci na normovanou hodnotu (tzn. 0,95-1,00) nejen v dobách minimálních a maximálních zatížení kotlů, ale zároveň i v době, kdy nejsou kotle v provozu.

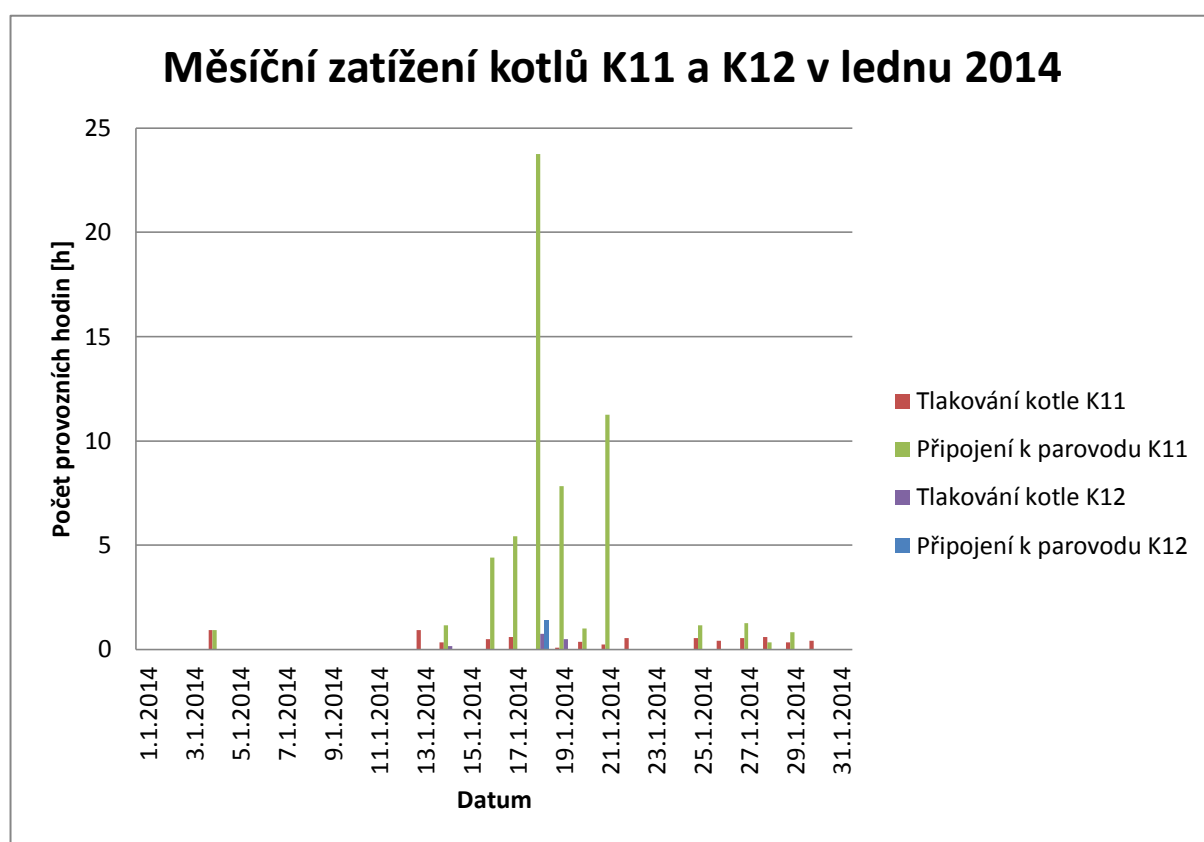
### 8.1 Zatížení zařízení v průběhu roku

Jak již bylo uvedeno provoz kotlů je závislý na okamžité potřebě dodávce páry, která se mění nejen v závislosti na ročním období, ale i v průběhu dne nepracují kotle nepřetržitě, pouze v době největšího odběru z parní sítě. Provoz kotlů *K11* až *K14* v roce 2014 je uveden v grafu (*Obr. 8.1*).



Obr. 8.1 Graf ročního provozu kotlů K11 – K14

Z tohoto grafu je zřejmé, že nejvytíženějším kotlem je K11 a K12, zatímco kotle K13 a K14 nebyly v provozu. Dále je z grafu patrné, že kotle jsou provozovány především v zimních měsících a dále v době plánovaných odstávek hlavního zdroje, které probíhají v měsíci dubnu a v měsíci červenci.



Obr. 8.2 Graf denního provozu kotlů K11 a K12

Z grafu denních provozních hodin v měsíci lednu je patrné, že největší spotřeba způsobená provozem kotlů nastává v ranních hodinách, kdy jsou velmi nízké teploty a dochází ke zvýšenému odběru tepla z parní sítě. Pro pokrytí těchto výkonových špiček se kotle *K11* popřípadě *K12* připravují (tlakují) k provozu v dostatečném časovém předstihu, aby v případě potřeby dodávek tepla byly schopny okamžitě tyto potřeby pokrýt. Jiná situace nastává v případě výpadku, nebo omezení výroby tepla na hlavním zdroji v *TOL*, kdy je nutné okamžitého nájezdu kotle na *ŠVOL* a provoz těchto kotlů je pak závislý na délce poruchy na *TOL*. Tento poruchový stav nastal dne 17.1.2014 při výpadku kotle *K13* v *TOL*, což je patrné na grafu denních provozních hodin (*Obr. 8.2*).

## **8.2 Určení maximálního zatížení**

Vzhledem k absenci naměřených hodnot okamžitého zatížení, stanovíme pouze informativní zatížení z hodnot instalovaných příkonů technologického zařízení. V tabulce *Tab. 8.1* jsou uvedena veškerá instalovaná zařízení kotle *K11* a *K12* a společná technologická zařízení pro oba kotle. Ve skutečnosti však ani při maximálním zatížení kotlů nejsou v provozu všechna zařízení, natož pak v minimálním zatížení. Pro určení horní hranice kompenzačního výkonu je důležité určit maximální zatížení při provozu kotle.

Tab. 8.1 Instalovaná zařízení pro kotle K11 a K12

Seznam zařízení pro kotle K11 a K12			
K11		K12	
Zařízení	Příkon [kW]	Zařízení	Příkon [kW]
Spalinový ventilátor SV111	132	Spalinový ventilátor SV121	132
Vzduchový ventilátor VV111	85	Vzduchový ventilátor VV121	85
Vzduchový ventilátor VV112	85	Vzduchový ventilátor VV122	85
Chladicí ventilátor 111	5,5	Chladicí ventilátor 121	5,5
Chladicí ventilátor 112	5,5	Chladicí ventilátor 122	5,5
Elektro napáječka EN111	100	Elektro napáječka EN121	100
Společná zařízení po oba kotle			
Zařízení		Příkon [kW]	
Čerpadlo UV1		18,5	
Čerpadlo UV2		18,5	
Čerpadlo UV3		18,5	
Kondenzační čerpadlo 1		7,5	
Kondenzační čerpadlo 2		15	
Kondenzační čerpadlo 3		30	
Prací čerpadlo		18,5	
Kompresor 1		22	
Kompresor 2		22	
Kompresor 3		22	
Nízkotlaké čerpadlo 1		4	
Nízkotlaké čerpadlo 2		4	
Nízkotlaké čerpadlo 3		4	
Nízkotlaké čerpadlo 4		4,8	
Nízkotlaké čerpadlo 5		4,8	
Vysokotlaké čerpadlo 1		22	
Vysokotlaké čerpadlo 2		22	
Vysokotlaké čerpadlo 3		22	
Vysokotlaké čerpadlo 4		22	
Vysokotlaké čerpadlo 5		22	
CELKOVÝ INSTALOVANÝ PŘÍKON PRO KOTLE K11 A K12		1150,1 kW	



Vzhledem k tomu, že nejsou k dispozici měřené hodnoty zatížení při maximálním výkonu kotle *K11* (popř. *K12*), budeme pro teoretický výpočet vycházet ze štítkových hodnot technologického zařízení provozovaného při maximálním výkonu kotle *K11* (popř. *K12*). Potřebná technologická zařízení pro provoz kotle *K11* (popř. *K12*) jsou uvedena v *Tabulce 8.2*.

*Tab. 8.2 Zařízení pro maximální chod kotle K11 (K12)*

Seznam zařízení současně v provoz pro kotel K11 (K12)	
Zařízení	Příkon [kW]
Spalovací ventilátor	132
Vzduchový ventilátor 1	85
Vzduchový ventilátor 2	85
Chladicí ventilátor	5,5
Elektro napáječka	100
Čerpadlo UV	18,5
Kondenzační čerpadlo	7,5
Prací čerpadlo	18,5
Kompresor	22
Nízkotlaké čerpadlo 1	4
Nízkotlaké čerpadlo 2	4
Vysokotlaké čerpadlo 1	22
Vysokotlaké čerpadlo 2	22
<b>CELKOVÝ PŘÍKON SOUČASNĚ UŽÍVANÝCH ZAŘÍZENÍ</b>	<b>526</b>

Teoretickým odhadem bude tedy nutno kompenzovat příkon cca 526 kW pro jeden kotel, to znamená 1052 kW pro oba kotle *K11* a *K12*. Tento odhad je však pouze velice informativní.

Obdobně provedeme výpočet pro kotle *K13* a *K14*, které se technologicky částečně liší od kotlů *K11* a *K12*. Výstavba těchto kotlů proběhla v jiné časové období a jejich konstrukce a technologické zařízení je od kotlů *K11* a *K12* odlišná. Instalovaná zařízení včetně uvedení jednotlivých příkonů těchto zařízení jsou uvedeny v *Tab. 8.3*. Obdobně jako jsme určili předpokládané teoretické zatížení při maximálním výkonu kotle *K11* (popř. *K12*), určili jsme toto zatížení pro kotel *K13* (popř. *K14*) viz *Tab. 8.4*.

Tab. 8.3 Instalovaná zařízení pro kotle K13 a K14

Seznam zařízení pro kotle K13 a K14			
K13		K14	
Zařízení	Příkon [kW]	Zařízení	Příkon [kW]
Spalinový ventilátor SV131	200	Spalinový ventilátor SV141	200
Spalinový ventilátor SV132	200	Spalinový ventilátor SV142	200
Vzduchový ventilátor VV131	75	Vzduchový ventilátor VV121	75
Vzduchový ventilátor VV132	75	Vzduchový ventilátor VV122	75
Chladicí ventilátor 131	5,5	Chladicí ventilátor 121	5,5
Chladicí ventilátor 132	5,5	Chladicí ventilátor 122	5,5
Elektro napáječka EN131	132	Elektro napáječka EN141	132
Elektro napáječka EN132	132		
Společná zařízení po oba kotle			
Zařízení	Příkon [kW]		
Čerpadlo UV1	30		
Čerpadlo UV2	30		
Čerpadlo UV3	30		
Kondenzační čerpadlo 1	7,5		
Kondenzační čerpadlo 2	7,5		
Kondenzační čerpadlo 3	7,5		
Kondenzační čerpadlo 61/1	18,5		
Kondenzační čerpadlo 61/2	18,5		
Jímka J1	3		
Jímka J3	3		
Jímka J4	2,2		
Stáčecí čerpadlo 1	11		
Stáčecí čerpadlo 2	11		
CELKOVÝ INSTALOVANÝ PŘÍKON PRO KOTLE K13 A K14	1700,7 kW		

Tab. 8.4 Zařízení pro maximální chod kotle K13 (K14)

Seznam zařízení současně v provoz pro kotel K13 (K14)	
Zařízení	Příkon [kW]
Spalovací ventilátor 1	200
Spalovací ventilátor 2	200
Vzduchový ventilátor 1	75
Vzduchový ventilátor 2	75
Chladicí ventilátor	5,5
Elektro napáječka	132
Čerpadlo UV	30
Kondenzační čerpadlo	7,5
Jímka	3
Stáčecí čerpadlo 1	11
Stáčecí čerpadlo 2	11
<b>CELKOVÝ PŘÍKON SOUČASNĚ UŽÍVANÝCH ZAŘÍZENÍ</b>	<b>750</b>

Stejně jako v předchozím případě můžeme odhadnout teoretickou horní hranici příkonu nutného ke kompenzování, a to asi 750kW pro kotel K13 (popř. K14).

### 8.3 Určení minimálního zatížení

Určení minimální hodnoty zatížení je nutné pro určení nejmenšího kompenzačního stupně. Provoz kotlů, jak již bylo zmíněno, je závislý na okamžité potřebě výroby páry. Bez ohledu na tuto potřebu je nutné udržovat pomocná technologická zařízení v provozu, která nám zajišťuje trvalou připravenost kotle k najetí. Zatížení těchto pomocných zařízení nám určuje minimální hranici zatížení pro stanovení nejmenšího kompenzačního stupně. Soupis těchto zařízení je uveden v tabulce Tab. 8.5. Jedná se převážně o čerpadla nutná k provozu pomocné technologie potřebné pro zajištění kotlů v pohotovostním stavu pro potřebu uvedení kotlů do provozu.

Tab. 8.5 Zařízení pro minimální chod ŠVOL

Seznam zařízení současně v provoz pro kotel K13 (K14)	
Zařízení	Příkon [kW]
Nízkotlaké čerpadlo oleje	4
Vysokotlaké čerpadlo oleje	22
Čerpadlo chladicí vody	3
Studna	3
Doplňovací čerpadlo	5,5
Kondenzační čerpadlo	18,5
Čerpadlo topení	1,1
Čerpadlo jímky	3
<b>CELKOVÝ PŘÍKON SOUČASNĚ UŽÍVANÝCH ZAŘÍZENÍ</b>	<b>60,1</b>

Hodnota minimálního příkonu pomocné technologie je 60,1kW. Tato hodnota je ale velmi nepřesná a pouze orientační. Jednotlivá zařízení jsou umístěna v různých rozvodnách a z tohoto důvodu je pro určení nejmenšího regulačního stupně nutné provést měření v příslušných rozvodnách.

## 9. Technické řešení kompenzace

### 9.1 Výběr způsobu kompenzace

Při výběru způsobu kompenzace je třeba brát v úvahu některé důležité faktory – konfiguraci kompenzované sítě, charakter kompenzovaných spotřebičů a dispoziční možnosti.

Z přiloženého přehledového schématu ŠVOL (příloha 1) můžeme vyloučit použití centrální kompenzace. Obecně je tento způsob kompenzace sice nejpoužívanější (viz. kapitola 4), ale také nejméně vhodnou metodou z důvodu neodlehčení rozvodné sítě od přenosu jalového výkonu. Množství způsobů propojení jednotlivých vývodů z centrální rozvodny ještě utvrzuje nevhodnost použití této metody. Problém by vyvstal i s umístěním

kompensátoru do rozvodny *R1* – kondenzátory dimenzované na výkon celé výtopny by byly velice prostorově náročné.

Dále můžeme vyloučit i individuální kompenzaci z důvodu velkého počtu prvků potřebných pro provoz výtopny. Víme sice, že tato metoda je nejvýhodnější co se vedení týče – nemusím jím přenášet nadbytečný jalový výkon, ale vzhledem k tomu, že se v tomto případě jedná již o zhotovenou soustavu, je tato výhoda naprosto irelevantní. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu kompenzace však je finanční náročnost, která souvisí s již zmiňovaným velkým počtem spotřebičů, tzn. čerpadel, ventilátorů apod. Náklady na koupi, instalaci a údržbu těchto kompensátorů by byly nesrovnatelně vyšší, než náklady ušetřené na vyšším účinníku.

Zůstává tedy poslední způsob – skupinová kompenzace. Vzhledem k provozování výtopny (viz. kapitola 8) a dispozičním vlastnostem tohoto technologického celku se jedná o ideální variantu. Nejvhodnějším řešením je umístění kompenzačního zařízení do rozvodů *rm1*, *rm13* a *rm14*, které slouží pro napájení technologických zařízení jednotlivých kotlů. Vzhledem k prostorové rezervě v rezervních polích těchto rozvaděčů by byla zajištěna výhoda umístění kompensátorů v blízkosti kompenzovaných zařízení.

## 9.2 Rozmístění kompenzace

Vzhledem ke způsobu provozování a zatěžování jednotlivých kotlů by bylo výhodné umístit jedno samostatné kompenzační zařízení pro kotle *K13* do rozvodny *rm13* a jedno samostatné kompenzační zařízení kotle *K14* do rozvodny *rm14* z důvodu jednoduchého umístění do rezervních polí v daných rozvodnách.

Co se týká kompenzace zařízení kotlů *K11* a *K12*, neoptimálnější řešení je instalace jednoho kompenzačního zařízení pro oba kotle z důvodu napájení těchto zařízení ze stejné rozvodny *rm1*. Další výhodou společného kompenzačního zařízení je způsob provozování těchto kotlů v případě potřeby společně. V již zmíněném rozvaděči *rm1* je stejně jako u předchozích rozvaděčů volné rezervní pole s dostatečnou prostorovou rezervou pro umístění kompenzačního zařízení.

Navrhované umístění kompenzačních zařízení je zakresleno v situačním schématu (příloha č.2).

## 9.3 Určení kompenzačního výkonu

Pro přesné určení kompenzačního výkonu je nezbytné provést měření okamžitých hodnot činného výkonu a stávajícího účinníku v jednotlivých rozvaděčích *ŠVOL* při různých zatížení. Pro organizační a časovou náročnost však toto měření nemohlo být pro potřeby této práce

uskutečněno. Určíme tedy orientačně potřebný kompenzační výkon ze zatížení pro jednotlivé kotle pro různé účinníky, kdy využijeme teoretické hodnoty celkového instalovaného příkonu.

Budeme-li uvažovat společnou skupinovou kompenzaci pro kotle *K11* a *K12* (tedy pro rozvodnu *rm1*), budou hodnoty kompenzačních výkonů pro různé hodnoty stávajícího účinníku:

*Tab. 9.1 Teoretické kompenzační výkony pro rozvodnu rm1 pro různé účinníky*

P[kW]	cosφ	cosφ <sub>k</sub>	Q <sub>c</sub> [kVAr]
1052	0,70	0,95	545
1052	0,72	0,95	507
1052	0,74	0,95	470
1052	0,76	0,95	432
1052	0,78	0,95	394
1052	0,80	0,95	356
1052	0,82	0,95	316
1052	0,84	0,95	275
1052	0,86	0,95	233
1052	0,88	0,95	189
1052	0,90	0,95	141

Příklad výpočtu potřebného jalového výkonu pro účinník cosφ=0,70 (1. řádek tabulky):

$$Q_c = P \cdot (tg\varphi - tg\varphi_k) = 1052 \cdot [tg(\arccos(0,70)) - tg(\arccos(0,95))] = 545 \text{ kVAr}$$

Pravděpodobný nejnižší účinník (u kterého musíme uvažovat nejvyšší kompenzační výkon) se bude pohybovat v rozmezí mezi hodnotami 0,7-0,9. Pro tento rozsah jsme provedli i teoretický výpočet, kdy potřebný kompenzační výkon vychází v intervalu **141 – 545 kVAr**. Skutečný maximální kompenzační výkon by se měl nacházet právě v tomto rozsahu.

Obdobně bude vypadat teoretický kompenzační výkon pro kotle *K13* a *K14*, které budou mít každý vlastní kompenzaci v příslušných rozvaděčích *rm13* a *rm14*:

*Tab. 9.2 Teoretické kompenzační výkony pro rozvodnu rm13/rm14 pro různé účinníky*

P[kW]	cosφ	cosφ <sub>k</sub>	Q <sub>c</sub> [kVar]
750	0,70	0,95	388
750	0,72	0,95	362
750	0,74	0,95	335
750	0,76	0,95	308
750	0,78	0,95	281
750	0,80	0,95	253
750	0,82	0,95	225
750	0,84	0,95	196
750	0,86	0,95	166
750	0,88	0,95	134
750	0,90	0,95	101

U těchto rozvodů se při obdobné úvaze pohybuje potřebný kompenzační výkon v rozmezí **101 – 388 kVar**.

Tyto kompenzační výkony však jsou pouze orientační a nemůžeme z nich určit hodnotu nejmenšího stupně kompenzátoru.

Pro přesné určení potřebné velikosti kondenzátorů navrhuji proměřit okamžité hodnoty činného výkonu a účinníku v jednotlivých rozvaděčích výše určených pro umístění kompenzátorů.

V případě rozvaděčů *rm13* a *rm14* je třeba provést měření při:

- odstávce kotle
- minimálním zatížení kotle
- chodu kotle na plný výkon

Pro rozvaděč *rm1* pak provést měření při:

- při odstávce obou kotlů
- chodu jednoho kotle – minimální zatížení
- chodu obou kotlů – minimální zatížení
- chodu jednoho kotle na plný výkon
- chodu jednoho kotle na plný výkon a minimálním zatížení druhého kotle
- chodu obou kotlů na plný výkon

Z těchto údajů pak bude možno přesně určit velikost jednotlivých stupňů kompenzátorů a skutečný maximální potřebný kompenzační výkon.

## 9.4 Cenový odhad realizace kompenzace

Kompenzační zařízení jako celek se skládá z několika jednotlivých zařízení. Mezi ty základní (cenově nejnáročnější) patří *kondenzátory*, *regulátory*, *stykače* a *kompenzační tlumivky* sloužící k filtrování vyšších harmonických v síti. Jejich řešení však přesahuje rámec této bakalářské práce a proto nebyly brány v úvahu. Z těchto prvků odhadneme celkové náklady na realizaci kompenzace v jednotlivých rozvodnách.

Pro kalkulaci jsem využil ceník firmy EMCOS s.r.o.

Bez změření skutečné hodnoty účinníku můžeme velikost kompenzačního výkonu pouze odhadovat. Z důvodu velkého množství zařízení v rozvodně *rmI* bude kalkulace vyhotovena pro hodnotu účinníku  $\cos\varphi=0,74$ , tedy kompenzační výkon 470kVAr.



Tab. 9.3 Cenová kalkulace pro kompenzaci rm1

Rozvodna rm1					
Název		Počet kusů	cena bez DPH za ks [Kč]	Celková cena bez DPH [Kč]	Celková cena s DPH 21% [Kč]
<b>Regulátor jalového výkonu</b>	počet stupňů				
QERP 416	16	1	10 800,-	10 800,-	13 068,-
<b>Kondenzátory</b>	[kVAr]				
CSADP 3-0,4/50	50	6	4 900,-	29 400,-	35 574,-
CSADP 1-0,4/25	25	4	2060,-	8240,-	9 970,-
CSADP 1-0,4/15	15	4	1 410,-	5 640,-	6 824,-
CSADP 1-04/5	5	2	940,-	1 880,-	2 275,-
<b>Stykače</b>	[kVAr]				
K3-62K00 230	50	6	1 710,-	10 260,-	12 415,-
K3-32K00 230	25	4	1 070,-	4 280,-	5 179,-
K3-24K00 230	20	4	880,-	3 520,-	4 259,-
K3-18K10 230	12,5	2	740,-	1 480,-	1 790,-
<b>Kompenzační tlumivky</b>	[kVAr]				
TKA1 75-189/400/440	66	6	3 800,-	22 800,-	27 588,-
TKA1 37,5-189/400/440	33	4	2 950,-	11 800,-	14 278,-
TKA1 25-189/400/440	22	4	1 900,-	7 600,-	9 196,-
TKC1 0,625-189/400/440	5,5	2	1 400,-	2 800,-	3 388,-
				<b>120 500 Kč</b>	<b>145 805 Kč</b>

Pro rozvodny *rm13* a *rm14* budou použita totožná kompenzační zařízení. Vzhledem tomu, že jsou v nich umístěny pouze spotřebiče pro jeden kotel, bude uvažována hodnota účinníku vyšší, a to hodnotu  $\cos\varphi=0,76$ , tedy kompenzační výkon 308 kVAr.

Tab. 9.4 Cenová kalkulace pro kompenzaci *rm13(rm14)*

Rozvodna rm13 (rm14)					
Název		Počet kusů	cena bez DPH za ks [Kč]	Celková cena bez DPH [Kč]	Celková cena s DPH 21% [Kč]
<b>Regulátor jalového výkonu</b>	počet stupňů				
QERP 416	16	1	10 800,-	10 800,-	13 068,-
<b>Kondenzátory</b>	[kVAr]				
CSADP 3-0,4/25	25	6	2 060,-	12 360,-	14 956,-
CSADP 1-0,4/20	20	4	1 800,-	7 200,-	8 712,-
CSADP 1-0,4/10	10	4	1 100,-	4 400,-	5 324,-
CSADP 1-04/5	5	2	940,-	1 880,-	2 275,-
<b>Stykače</b>	[kVAr]				
K3-32K00 230	25	6	1 070,-	6 420,-	7 768,-
K3-24K00 230	20	4	880,-	3 520,-	4 259,-
K3-18K10 230	12,5	6	740,-	4 440,-	5 373,-
<b>Kompenzační tlumivky</b>	[kVAr]				
TKA1 37,5-189/400/440	33	6	2 950,-	17 700,-	21 417,-
TKA1 25-189/400/440	22	4	1 900,-	7 600,-	9 196,-
TKC1-12,5-189/400/440	11	4	1 800,-	7 200,-	8 712,-
TKC1 0,625-189/400/440	5,5	2	1 400,-	2 800,-	3 388,-
				<b>86 320 Kč</b>	<b>104 447 Kč</b>

Uvedené výpočty jsou pouze orientační – nezahrnují náklady na kabeláže, objímky, jištění, úpravy ve stávajících rozvaděcích, atd. a především nejsou v cenové kalkulaci zahrnuty náklady na samotnou montáž a projektovou dokumentaci.

*Tab. 9.5 Shrnutí nákladů na základní komponenty*

Cenová kalkulace základních komponentů		
Položka	Celková cena bez DPH	Celková cena s DPH 21%
Kondenzátory	97 tisíc	118 tisíc
Tlumivky	116 tisíc	140 tisíc
Stykače	49 tisíc	59 tisíc
Regulátory	33 tisíc	40 tisíc
Celková cena základních komponentů	295 tisíc	357 tisíc

*Tab. 9.5 Celkové teoretické náklady*

Celková cenová kalkulace		
Položka	Celková cena bez DPH	Celková cena s DPH 21%
Základní komponenty	295 tisíc	357 tisíc
Dodatečný materiál (kabeláž, pojistky, měřicí přístroje apod.)	60 tisíc	73 tisíc
Zpracování technické dokumentace	25 tisíc	30 tisíc
Montážní a dodatečné práce	40 tisíc	50 tisíc
Celková cena základních komponentů	<b>420 tisíc</b>	<b>510 tisíc</b>

V případě zahrnutí veškerých nákladů na realizaci kompenzačního zařízení včetně výše uvedených činností a dodávek, je předpokládán rozpočet v rozmezí **500 000 - 550 000 Kč**.

## 10. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout kompenzaci účinníku vlastní spotřeby *Špičkové výtopny Olomouc*, která je součástí společnosti *Veolia Energie ČR, a.s.*

První část práce je zaměřena na teoretický rozbor dané problematiky. Jsou zde shrnuty základní pojmy, které jsou esenciální pro pochopení této práce, a důvody proč se kompenzace účinníku provádí. Dále jsou zde popsány způsoby instalace kompenzačních zařízení, druhy kompenzačních zařízení a možnosti jejich ovládání.

Druhá část se týká praktického návrhu kompenzačních zařízení pro zmiňovaný technologický celek, tedy pro *Špičkovou výtopnu Olomouc*. Nezbytným faktorem k přesnému návrhu kompenzace účinníku je provedení měření okamžitých hodnot jalového a činného výkonu při různých provozních zatíženích. Měření těchto hodnot však nemohlo být pro tuto bakalářskou práci, vzhledem k organizační a časové náročnosti, uskutečněno. Z těchto důvodů byly potřebné údaje čerpány pouze z provozní dokumentace, štítkových údajů technologického zařízení (čerpadel, ventilátorů, servopohonů, atd.) a z provozních záznamů jednotlivých kotlů. Zjištěné údaje sloužily pro stanovení maximální příkony všech zařízení nutných pro chod jednotlivých kotlů.

Poté bylo určeno ideální umístění kompenzačních zařízení – rozvodny *rm1*, *rm13* a *rm14*. V rozvodně *rm1* bylo navrženo společné kompenzační zařízení pro kotle *K11* a *K12*, oproti tomu pro kotle *K13* a *K14* bylo navrženo samostatné kompenzační zařízení pro každý kotel samostatně v jednotlivých rozvodnách *rm13* a *rm14*.

Následoval teoretický výpočet potřebného kompenzačního výkonu pro každé kompenzační zařízení. Bylo zjištěno, že pro kompenzační zařízení v rozvodně *rm1* se bude maximální kompenzační výkon pohybovat v rozmezí 141 – 545 kVAr. Pro zařízení v rozvodnách *rm13* a *rm14*, pak v rozmezí 101 – 388 kVAr.

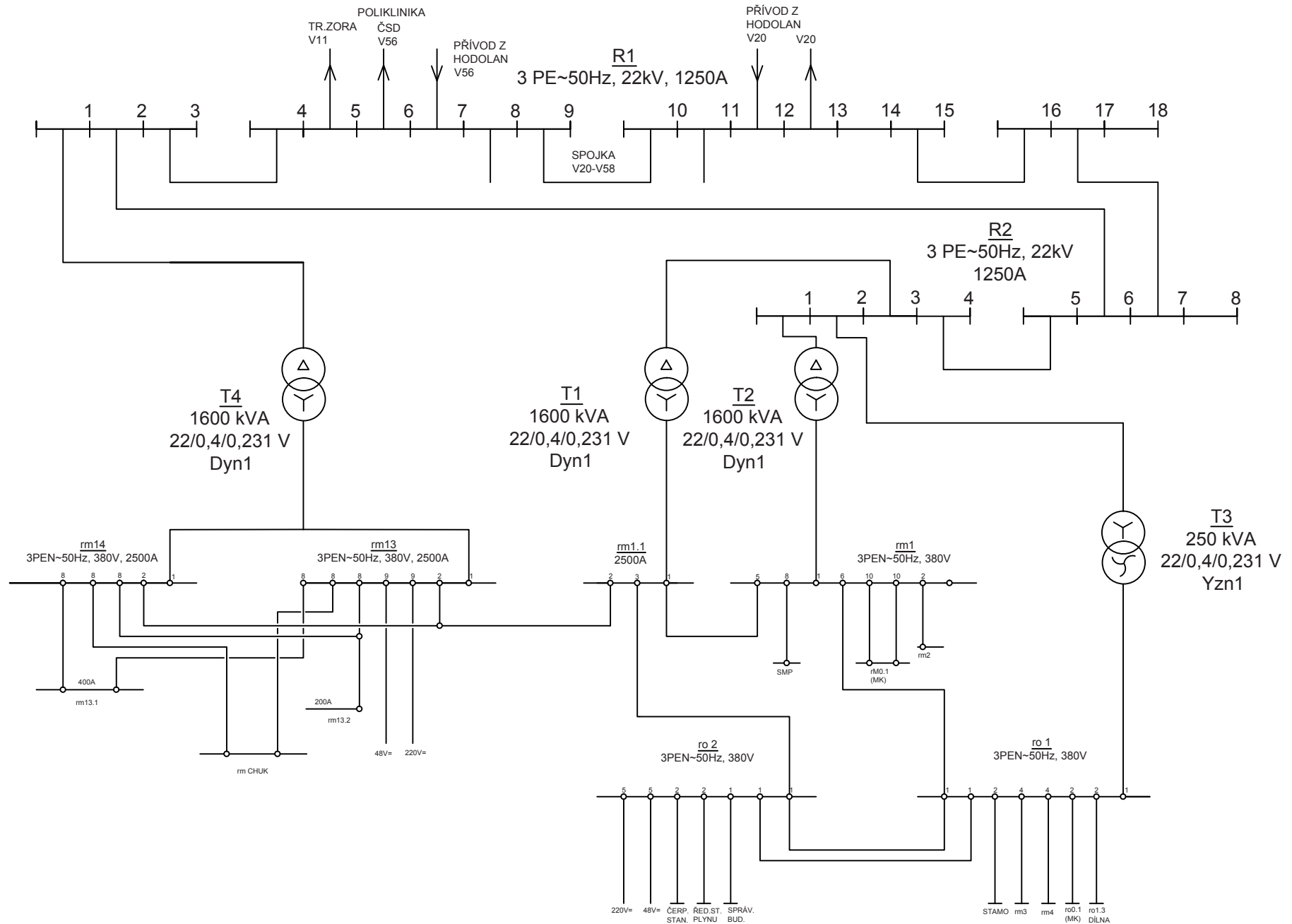
Dále je v této práci doporučeno provedení měření okamžitých hodnot zatížení při různých provozních stavech, které by mělo potvrdit a upřesnit teoreticky určené hodnoty.

V závěrečné části práce je provedena cenová kalkulace navrženého kompenzačního zařízení, včetně nákladů na projektovou dokumentaci, montážní práce a potřebné úpravy stávajících rozvaděčů.

## Seznam použité literatury

- [1] Korenc, V., Holoubek, J.: Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL, spol. s r.o. 1999. 123 s. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex a.s., Ostrava, 2008. 208 s. ISBN 978-80-248-1696.
- [3] Kijonka, J. a kol.: Teorie obvodů I. Skripta Vysoké školy báňské Ostrava, 2007. 196 s. ISBN 978-80-248-1488-9.
- [4] Kotěšovec, L.: Technické a ekonomické posouzení variant skupinové a centrální kompenzace. Plzeň, 2012. 146s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
- [5] Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta Vysoké školy báňské Ostrava, 1993. 214 s. ISBN 80-7078-032-0.
- [6] Cendelín, L.: Návrh chráněné kompenzace účinníku. Plzeň, 2012. 78s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [7] Technická dokumentace firmy *Veolia Energie ČR*.
- [8] Záznamy naměřených hodnot *Špičkové vytopy Olomouc*.
- [9] Zákon č. 458/2000 Sb. (energetický zákon).
- [10] Gurecký, J.: Materiály pro výuku předmětu Přenos a rozvod elektrické energie. VŠB-Technická univerzita Ostrava
- [11] EMCOS, s.r.o. Ceníky komponentů pro kompenzaci [online]. [přístup 30.4.2015]. Dostupné z: [http://www.emcos.cz/pdf/Cenik\\_komponent\\_2015-04.pdf](http://www.emcos.cz/pdf/Cenik_komponent_2015-04.pdf).
- [12] KBH Energy, a.s. Kompenzace jalového výkonu [online]. [přístup 30.4.2015]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/kompenzace/kompenzace-jaloveho-vykonu>.

# PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA VLASTNÍ SPOTŘEBY ŠVOL PŮVODNÍ STAV (BEZ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ)



# PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA VLASTNÍ SPOTŘEBY ŠVOL S KOMPEZAČNÍMI ZAŘÍZENÍMI

